

На правах рукописи



Ефимов Андрей Геннадьевич

**МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ СВЧ МОДУЛЕЙ
СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ**

Специальность 05.12.07
Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва – 2009

Работа выполнена в Государственном унитарном предприятии «Научно-производственный центр «СПУРТ» (г. Москва).

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Егоров Евгений Николаевич;

доктор технических наук, профессор Петров Александр Сергеевич;

доктор технических наук, профессор Тишин Юрий Иванович;

Ведущая организация: ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца (г. Москва)

Защита диссертации состоится «10» апреля 2009 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 850.012.01 ГУП НПЦ «СПУРТ» по адресу: 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-ый Западный проезд, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГУП НПЦ «СПУРТ».

Автореферат разослан «2» марта 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., с.н.с



Петров В.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Повышение интеграции узлов радиоэлектронной аппаратуры особенно важно для бортовой аппаратуры космической связи и носимой, подвижной и стационарной наземной аппаратуры.

Федеральная целевая Программа «Национальная технологическая база на 2007 – 2011 г.г.» предусматривает разработку базовых технологий и базовых конструкций электронных компонентов и приборов для сверхвысокочастотной электроники на основе последних достижений микроэлектроники.

При помощи сложных радиоэлектронных систем решаются вопросы обеспечения жизнедеятельности и безопасности современных высокоразвитых государств, поэтому "Основы политики Российской Федерации в области развития электронной компонентной базы на период до 2010 года и дальнейшую перспективу», утвержденные Президентом Российской Федерации 11 апреля 2002 года, предусматривают концентрацию усилий и ресурсов на критических направлениях развития электронной компонентной базы, к числу которых отнесено и создание сложных функциональных блоков, в том числе СВЧ диапазона.

Вопросам актуальности микроминиатюризации аппаратуры связи и радиолокации посвящены многочисленные работы Гуськова Г.Я., Блинова Г.А., Коледова Л.А., Панасенко П.В., Реброва С.И., Сестрорецкого Б.В., Чистякова Н.И. и других.

Развитие технологии изготовления арсенид-галлиевых транзисторов с затвором Шотки (ПТШ) позволило перейти к проектированию СВЧ интегральных схем. До начала исследований в данной области существовали единичные разработки однофункциональных арсенид-галлиевых ИС низкой степени интеграции. Стояла задача выбора и обоснования базовой технологии арсенид-галлиевых ИС различного функционального назначения для использования в СВЧ модулях конкретных изделий космической связи, что накладывало особые требования к сокращению сроков разработки, обеспечению повышенной надежности, определению оптимальной сложности в сочетании с приемлемым выходом годных при изготовлении серийных образцов ИС на основе промышленных структур арсенида галлия.

На момент начала выполнения данной работы отсутствовал промышленный выпуск арсенид-галлиевых интегральных схем СВЧ диапазона, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к бортовой аппаратуре связи нового поколения. Не существовало комплексного подхода к проектированию арсенид-галлиевых интегральных схем, позволяющего реализовать всю номенклатуру функциональных схем,

требуемых для построения АФАР, на основе полупроводниковых структур арсенида галлия промышленного изготовления. Отсутствовала информация о надежных характеристиках и радиационной стойкости таких устройств.

С появлением новых тенденций развития систем спутниковой связи возникла необходимость построения многоканальных модулей многолучевых АФАР. Существовавшие схемотехнические решения построения СВЧ модулей не позволяли реализовать разводку диаграммообразующей системы в интегральном виде. Возникла необходимость создания многофункциональных космических аппаратов, что потребовало решения проблемы электромагнитной совместимости за счет оптимального использования микрополосковых полосно-пропускающих фильтров и объемных фильтров на диэлектрических резонаторах.

Отмечается существенное повышение интеграции СВЧ узлов при использовании технологии поверхностного монтажа элементов, что позволяет выполнять разработки в сжатые сроки. Решены вопросы интеграции микрополосковых фильтров в платы из композитных материалов или за счет использования навесных микрополосковых фильтров, что при низкой добротности является решением для высокой промежуточной частоты. Для использования высокодобротных элементов, таких как диэлектрические резонаторы, необходимо было решить ряд схемотехнических, конструктивных и технологических задач.

Развитие технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС) позволяет получать элементы с уникальными возможностями. Одним из элементов МЭМС для использования в СВЧ диапазоне является переключатель. Однако, отсутствовал общий подход к МЭМС переключателям как к СВЧ элементам, так как до последнего времени не существовало отечественной технологии получения таких элементов. Не рассматривался вопрос реализации МЭМС элементов СВЧ диапазона на основе алмазоподобных пленок (АПП).

Таким образом, научно-техническая проблема, которая решается в данной работе заключается в разработке комплексного подхода к схемотехническим, технологическим и конструкторским решениям при создании элементов и модулей СВЧ диапазона для космических систем связи.

Объектом исследования являются арсенид-галлиевые интегральные схемы, микросборки на их основе, гибридные интегральные схемы, сложные одно- и многофункциональные модули СВЧ диапазона.

Предметом исследования являются модели, методы и алгоритмы проектирования, технология и конструкция указанных выше компонентов.

Цель и задачи работы.

Целью диссертационной работы является решение научно-технической проблемы создания СВЧ модулей высокой степени интеграции для систем космической связи нового поколения. Совокупность теоретических, научно обоснованных технических решений, конструкторско-технологических основ проектирования и реализация устройств вносит значительный вклад в развитие экономики страны и повышение ее обороноспособности.

Цель достигается путем решения следующих задач:

1. Исследование принципов проектирования арсенид-галлиевых ИС различного функционального назначения с высокой радиационной стойкостью и длительной наработкой на отказ.
2. Определение конструктивно-технологических требований к активным элементам арсенид-галлиевых ИС.
3. Построение многоканальных приемных модулей многолучевых АФАР с высокой повторяемостью параметров для серийного производства.
4. Определение критериев проектирования входных приемных трактов АФАР для работы в сложной электромагнитной обстановке.
5. Определение требований к микроэлектромеханическим элементам, изготовленным на основе аморфных алмазоподобных пленок, для использования в СВЧ диапазоне частот.

Методы исследований.

При проведении исследований в диссертационной работе использовался математический аппарат, основанный на классических методах линейной алгебры и теории цепей, методы компьютерного моделирования и проектирования и натурального эксперимента. Использовались элементы теории надежности и метод экспертных оценок.

Научная новизна.

Исследованы и реализованы принципы проектирования арсенид-галлиевых ИС различного функционального назначения в СВЧ диапазоне.

Определены и сформулированы общие и частные конструктивно-технологические ограничения на проектирование активных элементов арсенид-галлиевых ИС.

Предложена методика оценки времени потери работоспособности СВЧ арсенид-галлиевых ИС во время импульсного воздействия факторов ядерного взрыва.

Разработана концепция построения многоканальных приемных модулей многолучевых АФАР для работы в сложной электромагнитной обстановке.

Теоретически обосновано и практически подтверждена возможность использования полосно-пропускающих фильтров на диэлектрических резонаторах в конструкции СВЧ модулей с технологией поверхностного монтажа.

Определены требования к микроэлектромеханическим переключателям, изготовленным на основе алмазоподобных пленок, для применения в устройствах СВЧ диапазона.

Основные научные результаты и положения, выносимые на защиту.

Результаты разработки ряда модулей СВЧ диапазона на основе арсенид-галлиевых интегральных схем с длительной наработкой на отказ и высокой радиационной стойкостью для бортовой и наземной аппаратуры систем космической связи.

Схема унифицированного переключательного кристалла, позволяющая реализовать на его основе многоразрядный фазовращатель, фазовый модулятор, согласованный ключ и плавный аттенуатор в диапазоне частот до 5 ГГц.

Методы проектирования устройств СВЧ диапазона различного функционального назначения на основе однокаскадных усилителей в монолитном исполнении.

Схема построения многоканальных приемных модулей многолучевых АФАР на основе синфазной двухуровневой разводки, позволяющей получать в широкой полосе частот минимальный фазовый разброс каналов с минимальным взаимным влиянием каналов.

Принцип построения приемных трактов АФАР с распределенной фильтрацией с целью обеспечения помехозащищенности и реализации минимальных шумовых характеристик с основным критерием сохранения линейного режима работы входных каскадов.

Обоснование возможности применения фильтров на высокочастотных диэлектрических резонаторах в конструкции модулей с поверхностным монтажом элементов на текстолитовую подложку.

Оценка конструктивно-технологических параметров микроэлектромеханического переключателя на основе алмазоподобных пленок для работы в СВЧ диапазоне.

Практическая значимость научных положений и выводов диссертационной работы.

1. Практическая значимость научных положений и выводов диссертационной работы заключается в разработке ряда арсенид-галлиевых ИС различного функционального назначения,

использованных в приемных и передающих модулях систем космической связи 17P53, 17P78, В-200, В-400.

2. Разработана концепция построения многоканальных приемных модулей многолучевых АФАР, адаптированная к серийному производству. Построение модулей с использованием данной концепции позволило реализовать бортовую приемную АФАР изделия 14P512 с высокими техническими и массогабаритными характеристиками.
3. Использование распределенной фильтрации в приемных трактах АФАР обеспечивает высокую помехозащищенность и способность функционирования в сложной электромагнитной обстановке.
4. Использование полосно-пропускающих фильтров на диэлектрических резонаторах в сочетании с технологией поверхностного монтажа элементов позволило спроектировать ряд блоков для малогабаритных станций космической связи ППС2Г1 и ППС2Г1.01. Блоки имеют высокую технологичность, малую трудоемкость сборки и регулировки. Использование технологии поверхностного монтажа позволило в короткие сроки спроектировать, изготовить и испытать приемные конверторы Кв- и Х- диапазонов для станций приема информации с КА дистанционного зондирования Земли 11Ф664 №2 и «Метеор-3М», соответственно.
5. Получены высокочастотные характеристики первых отечественных микромеханических переключателей на основе аморфных алмазоподобных пленок, что позволяет использовать их в качестве управляющих элементов интегральных схем фазовращателей и переключателей СВЧ диапазона.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается

-комплексностью проведенных исследований с использованием современных средств компьютерного моделирования;

-многократной экспериментальной проверкой теоретических результатов;

-обсуждениями на научно-технических конференциях, ссылками в технической литературе, а также экспертизами заявок на изобретения;

-положительными результатами использования результатов в промышленных образцах, изготовленных по типовым технологическим процессам микроэлектроники.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы в виде конструкторских и технологических документов внедрены на предприятиях НПО «Элас» г. Зеленоград, ПО «Радий» г. Москва, ПО «Тантал» г. Саратов, ГУП НПЦ «Спурт» г. Зеленоград, ОАО «Ижевский радиозавод» г. Ижевск, ОАО «Завод «Компонент» г. Зеленоград, ФГУП «НИИ Физических проблем им. Ф.В. Лукина»

г. Зеленоград.

Апробация работы.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на международных, всесоюзных и всероссийских научно-технических конференциях и семинарах:

- Семинар «Проблемы и перспективы производства МЭА» Зеленоград. 1983

- Семинар «Проблемы и перспективы производства МЭА» Зеленоград. 1985

- Научно-технический семинар МЭП Фрязино. 1985

- Семинар «Современная технология производства СВЧ схем». Минск. 1989

- Семинар «Проблемы и перспективы построения широкополосных усилителей мощности в системах передачи информации» Севастополь. 1990

- Всесоюзная конференция "Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды". Ереван. 1990

- 2-я Крымская конференция «СВЧ -техника и спутниковый прием». Севастополь. 1992

- 3-я Международная конференция «Спутниковая связь». Москва. 1998.

-13-я Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2003)

-15-я Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2005)

-16-я Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2006)

Публикации.

Основные результаты диссертации изложены в 52 работах, в том числе 37 научно-технических публикациях. Из них 10 статей опубликовано в научно-технических журналах РФ из перечня ВАК Минобразования, 1 авторском свидетельстве СССР, 1 положительном решении на выдачу патента РФ, 1 заявке на изобретение и 12 научно-технических отчетах НИОКР.

Личный вклад. Все выносимые на защиту результаты и положения, составляющие основное содержание диссертационной работы разработаны и получены лично автором или при его непосредственном участии.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 190 наименований и приложений. Общий объем работы без учета приложений составляет 210 страниц, Диссертация содержит 68 рисунков и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, сформулированы цель и задача диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, определяется структура и объем диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены основные принципы построения СВЧ модулей систем космической связи. Дана классификация модулей по выполняемым функциям и проведена оценка состояния СВЧ элементной базы. На основе анализа отечественных и зарубежных работ определены тенденции путей повышения степени интеграции СВЧ модулей бортовой и наземной аппаратуры систем космической связи. Рассмотрены основные технологии изготовления СВЧ модулей систем космической связи.

Во второй главе приведены результаты проектирования и использования в СВЧ модулях арсенид-галлиевых интегральных схем оригинальной разработки.

Наибольшее освещение в литературе получили вопросы проектирование интегральных схем маломощных усилителей, поэтому внимание акцентировалось на эффективности применения в СВЧ модулях интегральных схем фазовращателей и усилителей мощности.

В разделе 2.1 проведен анализ работы арсенид-галлиевого ПТШ в ключевом режиме.

На основе малосигнальной модели транзистора оптимизирована ширина ПТШ в пассивном включении в зависимости от схемы включения в СВЧ тракт. Обосновано использование ПТШ в пассивном включении в качестве переключающего элемента ИС фазовращателя с последовательным включением на частотах до 4-5 ГГц и параллельным – на частотах свыше 4-5 ГГц.

Обоснована необходимость использования технологии «воздушных мостов» для формирования многосекционных полевых транзисторов с шириной затвора более 1 мм с минимальной паразитной емкостью межпересечений.

Исследована зависимость параметров СВЧ ключа от электрофизических параметров исходных структур арсенида галлия. Показано, что с повышением концентрации легирующей примеси N_0 снижаются прямые потери при заданном уровне запирания. Ограничением на увеличение концентрации является напряжение пробоя цепи затвор-исток ПТШ. На основе полученных моделей ПТШ показано наибольшее влияние сопротивления омических контактов на характеристики ИС фазовращателей.

Проведена оценка эффективности введения короткозамкнутых индуктивных шлейфов в цепь исток-сток ПТШ с целью снижения

прямых потерь без существенного сужения рабочей полосы частот (Рис.1).

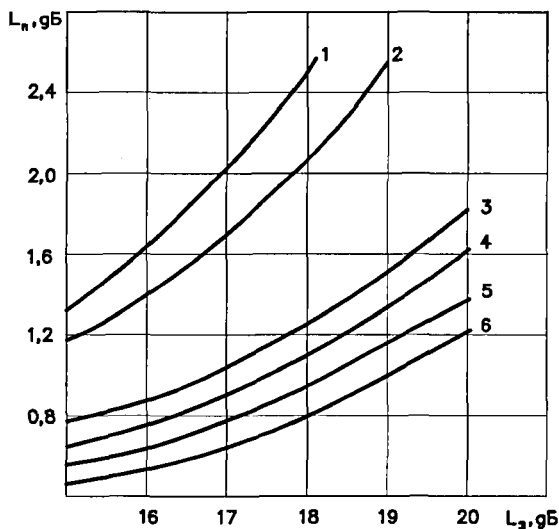


Рис. 1 Решение задачи оптимизации при наличии индуктивных шлейфов
 1, 3, 5 – $N_0 = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 2, 4, 6 – $N_0 = 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$
 1, 2 – шлейфы отсутствуют; 3, 4 – шлейф в цепи затвора;
 5, 6 – шлейф в цепи стока.

Раздел 2.2 посвящен вопросам реализации СВЧ фазовращателей на основе арсенид-галлиевых интегральных схем.

Спроектированы и исследованы три типа первых отечественных фазовращателей на основе арсенид-галлиевых ИС. На кристалле размером $3 \times 3 \times 0,4 \text{ мм}^3$ реализован аналоговый фазовращатель трехсантиметрового диапазона с максимальным фазовым сдвигом 120 градусов. На таком же кристалле реализован 180 градусный разряд фазовращателя на переключаемых отрезках линии и на кристалле $3 \times 2 \times 0,4 \text{ мм}^3$ получены разряды фазовращателя отражательного типа на дискреты 45 и 90 градусов.

Проведена оценка максимальной управляемой мощности. При номинальном значении управляющего напряжения СВЧ ключ или фазовращатель не изменяют своих характеристик до уровня мощности 150...200 мВт, При увеличении управляющего напряжения мощность может быть увеличена до уровня 1,2 Вт, ограничением на увеличение управляющего напряжения является напряжение пробоя ПТШ.

Разработан универсальный управляющий кристалл, на основе которого возможно построение согласованного СВЧ ключа, фазового

модулятора, многоразрядного фазовращателя, переключателя, плавного аттенюатора в диапазоне частот до 5 ГГц (Рис.2).

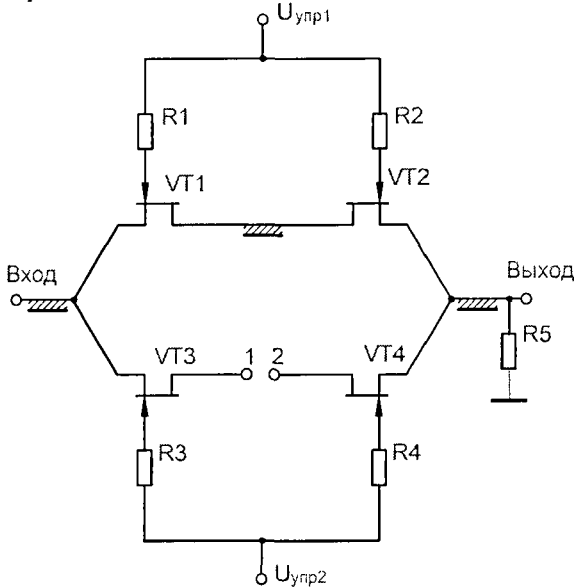


Рис. 2 Электрическая схема ИС универсального кристалла на ПТШ в последовательном включении

Проведенные автором исследования послужили толчком к широкому использованию в отечественных разработках управляющих устройств арсенид-галлиевых ПТШ в пассивном включении. Дальнейшее развитие проведенные исследования получили в работах Мартыновой В.П. и Орлова О.С.

В разделе 2.3 рассмотрены особенности проектирования интегральных схем усилителей средней мощности (УСМ) с выходной мощностью до 1,0 Вт и усилителей мощности (УМ) в гибридном исполнении с выходной мощностью до 5,0 Вт. При проектировании ИС УСМ использование эквивалентной схемы транзистора дает значительную погрешность в режиме большого сигнала, поэтому был выбран метод описания ПТШ на основе его внешних характеристик как четырехполюсника, основанный на непосредственном измерении параметров в реальном режиме возбуждения, нагрузки и питания. Проектирование усилителей мощности разбивается на три крупных этапа:

- измерение входных и выходных импедансов транзисторов в заданном частотном диапазоне при требуемых входной мощности, напряжении питания и смещения ;

-синтез структур согласующих цепей и оптимизация номиналов их элементов;

-определение геометрических размеров согласующих цепей и реализация всего усилителя на кристалле.

Автором был использован метод тестовых плат для непосредственного измерения параметров ПТШ на большом сигнале. Ранее данный метод успешно применялся только для определения входных и выходных импедансов мощных корпусированных транзисторов.

Экспериментально показано, что построение УСМ по схеме с автосмещением повышает эксплуатационные качества усилителя в части устойчивости к перегрузке входной мощностью, изменению фазы нагрузки и аварийному снятию нагрузки.

Указанный подход был реализован при проектировании интегральных усилителей мощности в диапазоне частот 3 - 5 ГГц ХА7.344.275, ХА7.344.278 и 10-13 ГГц ХА7.344.232, которые успешно применялись в составе герметичных модулей бортового радиотехнического комплекса 17Р78 и изделий СНА-21, СНА-28 наземного приемного комплекса 14Ц20. Кристалл усилителя мощности ХА7.344.278 использовался в четырехканальном передающем блоке ХА2.030.219 переносной станции спутниковой связи В-400М.

В разделе 2.4 дана оценка эффективности использования арсенид-галлиевых интегральных схем в СВЧ аппаратуре.

Показано, что разработанные ИС усилителей могут служить основой для реализации устройств различного функционального назначения. Так на основе серийной микросборки МШУ ХА3.469.401 был реализован регулятор комплексных амплитуд (РКА) с рабочим диапазоном частот 3,4...3,5 ГГц. В состав РКА входят два регулируемых канала с глубиной регулировки амплитуды не менее 25 дБ, диапазоном модуляции по амплитуде 10 дБ и диапазоном изменения фазы от 0 до 360°. Реализованный на основе серийных микросборок МШУ РКА использовался в опытной системе адаптации к сигнально-помеховой обстановке.

На основе интегральной схемы усилителя может быть получен генератор, посредством включения в обратную связь избирательного устройства соответствующего диапазона. При использовании высокочастотного диэлектрического резонатора реализуется высокостабильный генератор, причем генерация реализуется во всем частотном диапазоне положительного усиления системы усилитель - резонатор, что позволяет получить целое семейство генераторов, где рабочая частота определяется резонансной частотой резонатора. При включении в цепь обратной связи микрополоскового резонатора с варактором, реализуется генератор, управляемый напряжением (ГУН),

полоса перестройки зависит от глубины обратной связи и без дополнительных согласований достигает 10% от рабочей частоты, Выходная мощность генератора соответствует выходной мощности интегрального усилителя.

Проведенные исследования показали эффективность построения на основе ИС маломощных усилителей повышающих и понижающих смесителей с положительным коэффициентом передачи.

Проведено сравнение эффективности использования однокаскадных ИС с сортировкой кристаллов по основным параметрам и многокаскадных усилителей. На основе разработанных моделей была спроектирована схема четырехкаскадного усилителя средней мощности трехсантиметрового диапазона с выходной мощностью 200 мВт на кристалле размером 2x3x0,15 мм.

На период выполнения работ в данном направлении отсутствовали типовые технические решения для проектирования кристаллов и библиотеки активных элементов. Обобщенный алгоритм проектирования ИС представлен на рис.3. Включение в топологию кристалла тестовых элементов позволяет контролировать промежуточные статические параметры и оценивать разброс характеристик.

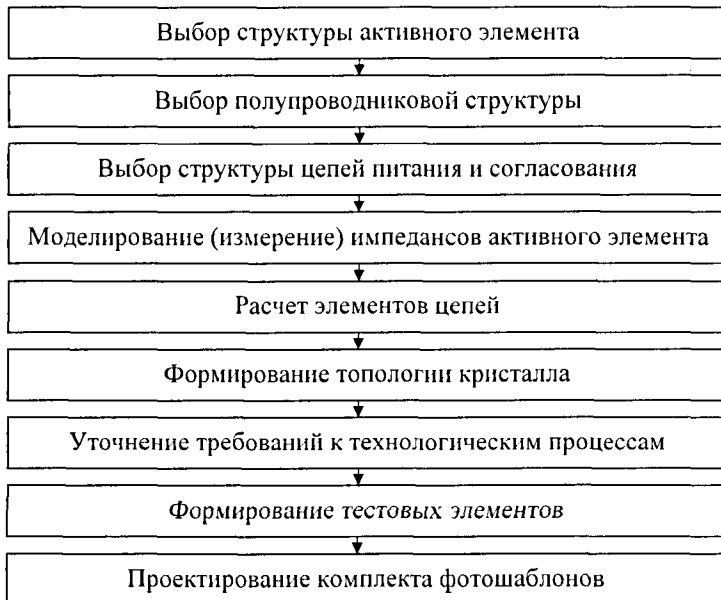


Рис. 3 Обобщенный алгоритм проектирования СВЧ ИС

По главе 2 сделаны следующие выводы:

1. Проведен анализ работы арсенид-галлиевого ПТШ в ключевом режиме. Получены зависимости характеристик переключателя на основе арсенид-галлиевого ПТШ в пассивном включении от ширины транзистора, способа включения в СВЧ тракт и рабочей частоты для получения требуемых прямых потерь и запириания. Показана возможность достижения требуемых характеристик при использовании промышленных эпитаксиальных структур арсенида галлия.

2. Получены первые отечественные СВЧ фазовращатели на основе арсенид-галлиевых ИС трех типов.

3. Предложена схема унифицированного переключательного кристалла, позволяющая реализовать на его основе многоуровневый фазовращатель, фазовый модулятор, согласованный ключ и плавный аттенуатор в диапазоне частот до 5 ГГц.

4. Показана возможность построения функциональных узлов СВЧ диапазона и сложных многофункциональных устройств, таких как регулятор комплексных амплитуд, на основе однокаскадных усилителей в монолитном исполнении для повышения унификации аппаратуры.

5. Обосновано проектирование топологии кристаллов усилителей мощности на основе непосредственного измерения параметров ПТШ на большом уровне сигнала методом тестовых плат. Данный подход сокращает число итераций при проектировании и обеспечивает высокое совпадение параметров, заданных и полученных экспериментально.

6. Техничко-экономический эффект от проведенных автором работ достигается за счет:

- сокращения, по сравнению с существующими, площади кристаллов ИС;

- повышения коэффициента выхода годных кристаллов за счет оптимизации структуры транзистора;

- сокращения числа итераций при проектировании топологии кристаллов;

- повышения степени унификации кристаллов арсенид-галлиевых ИС в СВЧ модулях.

В третьей главе рассмотрено влияние технологических аспектов на параметры арсенид-галлиевых интегральных схем и СВЧ модулей на их основе.

В разделе 3.1 рассмотрена базовая технология изготовления СВЧ арсенид галлиевых ИС.

Разработка всех типов интегральных схем проводилась применительно к базовой технологии НИИ Микроприборов НПО «Элас». Основными ключевыми этапами технологического маршрута являются:

- формирование активной области транзистора на основе эпитаксиальных структур арсенида галлия;
- формирование омических контактов транзистора на основе металлической системы Au-Ge-Au;
- многостадийное формирование затвора на основе металлической структуры V-Au-V;
- формирование защитного слоя и диэлектрика конденсаторов на основе пленки SiO₂;
- формирование второго слоя металлизации с использованием гальванического наращивания золота;
- утонение пластин и напыление металлизации обратной стороны микросхемы нихром-никель-золото.

Для объединения секций транзисторов с минимальной паразитной индуктивностью и для улучшения теплоотвода от активной зоны транзистора используется технология «воздушных мостов», где на технологические островки фоторезиста толщиной 2,2-3,5 мкм наращивается гальваническое золото.

Формирование сквозных металлизированных отверстий используется для улучшения теплоотвода от активной зоны ПТШ и безындуктивного заземления элементов СВЧ МИС. Экспериментальное сравнение мощных тестовых транзисторов, изготовленных со сквозными отверстиями и без них, показало снижение теплового сопротивления более чем в 3 раза (до 5,0-5,9 °C/Вт) и в 2 раза уменьшает его разброс. Уменьшение паразитной индуктивности в цепи истока повышает коэффициент передачи и устойчивость работы схемы, кроме того, появляется возможность заземлить элемент МИС в любом месте кристалла, а использование для заземления проволочных выводов позволяет заземлять элементы, расположенные только на краях кристалла. Проведена оценка эффективности использования сквозных металлизированных отверстий для заземления элементов кристалла арсенид-галлиевой ИС через расчет индуктивности в зависимости от толщины подложки и диаметра отверстия (Рис.4).

За основу взята формула:

$$L = \mu_0 \cdot h / (2\pi) [\ln(2\sqrt{r^2 + h^2} / r - 1)]$$

- где L [Гн] – индуктивность сквозного металлизированного отверстия;
 $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ [Гн/м] – магнитная проницаемость свободного пространства;
 h [м] – толщина подложки;
 r [м] – радиус отверстия.

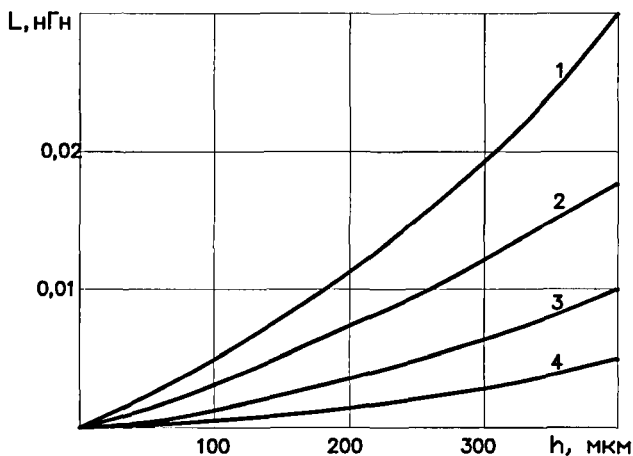


Рис. 4 - Зависимость индуктивности сквозного отверстия от толщины подложки и диаметра отверстия:
1 - 20 мкм; 2 - 50 мкм; 3 - 100 мкм; 4 - 200 мкм.

В разделе 3.2 рассмотрена технология изготовления бескорпусных и герметичных модулей на основе арсенид-галлиевых интегральных схем.

Проведен сравнительный анализ влияния на высокочастотные характеристики интегральных усилителей проволочных выводов диаметром 30 мкм и плоских проводников толщиной 20 мкм. Показана целесообразность использования плоских проводников в СВЧ тракте и заземления элементов кристалла на частотах выше 10 ГГц.

Раздел 3.3 посвящен оценке надежности и радиационной стойкости арсенид-галлиевых ИС, изготовленных по базовой технологии на основе промышленных эпитаксиальных структур арсенида галлия.

На основании разработанного 22ЦНИИ МО РФ руководящего материала «Подготовка и ведение ускоренных испытаний твердотельных СВЧ модулей на безотказность и долговечность» была проведена оценка минимальной наработки на отказ бескорпусных модулей на основе арсенид-галлиевых ИС. Проведенные испытания подтвердили время минимальной наработки на отказ интегральных усилителей средней мощности более 100 000 часов, что позволяет создавать на основе разработанных арсенид-галлиевых ИС аппаратуру для космических аппаратов со сроком активного существования более 10 лет.

Результаты расчетных значений наработок до отказа, полученных с помощью пакета программ "Prognoz" ВАЯП.00042-01, разработанного в ГУП НПО «СПУРТ» на основе алгоритма расчета нормированной автокорреляционной функции процесса деградации электрических параметров, показывают величину более 110 000 часов. На основании

графо-аналитического анализа результатов измерений в качестве основной модели прогнозирования наработки до отказа выбрано уравнение линейной регрессии:

$$Y = a \cdot x + b,$$

где

$$a = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^k x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^k x_i \cdot \sum_{i=1}^k y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^k x_i^2 - (\sum_{i=1}^k x_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^k y_i \cdot \sum_{i=1}^k x_i^2 - \sum_{i=1}^k x_i \cdot \sum_{i=1}^k y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^k x_i^2 - (\sum_{i=1}^k x_i)^2}$$

x_i – моменты времени измерений,

y_i – значения измеренных электрических параметров в моменты x_i .

При прогнозировании наработки до отказа опытных образцов ИС МШУ учитывались следующие параметры и их граничные значения:

Y_1 – коэффициент передачи (8,0 – 12) дБ;

Y_2 – коэффициент шума (2,0 – 3,5) дБ;

Y_3 – постоянный рабочий ток (8 – 15) мА.

Экспериментально проведена оценка радиационной стойкости (РС) арсенид-галлиевых ИС в рабочих режимах эксплуатации по динамическим характеристикам. При оценке работоспособности ИС УСМ использовался быстродействующий СВЧ детектор мощности, расположенный вне активной зоны воздействия.

Арсенид-галлиевые ИС МШУ и УСМ, изготовленные по базовой технологии на серийных полупроводниковых структурах, в составе герметичных корпусов показали стойкость к воздействию специальных факторов с характеристиками И1, И2, И3, С1, С3 со значениями характеристик, соответствующих группе ЗУ ГОСТ В 20.39.404-81, что позволяет использовать данные типы схем в составе герметичных корпусов из материала Д16Т на поверхности КА без дополнительной защиты.

По главе 3 сделаны следующие выводы:

1. Определена базовая технология изготовления арсенид-галлиевых интегральных схем СВЧ диапазона для космических систем связи на основе промышленных эпитаксиальных структур.
2. Показана эффективность сквозных металлизированных отверстий

для заземления элементов СВЧ интегральной схемы в произвольном месте кристалла и обеспечении отвода тепла от активной зоны транзистора. Проведен сравнительный анализ влияния на параметры арсенид-галлиевых ИС проволочных выводов и плоских проводников. Показано, что на частотах выше 10 ГГц плоские проводники имеют меньшее влияние на параметры интегральных усилителей.

3. Базовая технология изготовления кристаллов СВЧ усилителей средней мощности обеспечивает минимальную наработку на отказ более 100 000 часов. Ускоренные надежностные испытания ИС МШУ по методу Аррениуса при рабочих температурах 240° С, 200° С, 150° С, и 125° С демонстрируют значение минимальной наработки на отказ 1×10^6 часов при нормальных условиях эксплуатации.

4. Проведена оценка радиационной стойкости арсенид-галлиевых ИС и их надежностные характеристики для построения на их основе аппаратуры для космических аппаратов со сроком активного существования более 10 лет. Предложена методика оценки времени потери работоспособности СВЧ арсенид-галлиевых ИС во время импульсного воздействия факторов ядерного взрыва.

Во четвертой главе рассмотрены вопросы построения СВЧ модулей повышенной интеграции на основе дискретных элементов для поверхностного монтажа. Эффект достигается применением новых схемотехнических решений и широким использованием компьютерного моделирования, что позволяет оценить взаимное влияние элементов при увеличении плотности монтажа.

В разделе 4.1 рассмотрены примеры реализации маломощных приемных конверторов на дискретных элементах для поверхностного монтажа импортного производства.

Показано, что использование унифицированных дискретных элементов зарубежного производства и современных методов проектирования позволяет в короткие сроки создавать аппаратуру с высокими техническими характеристиками без специальной организации серийного производства. Приведены результаты применения приемных конверторов X- и Ku -диапазонов в станциях приема информации с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли 11Ф664 и «Метеор-3М».

Заслуга автора состоит в организации альтернативного приемного тракта при сохранении работоспособности существующего тракта, действующего приемного комплекса 14Ц20.

Использование зарубежной элементной базы потребовало дополнительного объема испытаний в составе блоков для обеспечения надежности работы приемной аппаратуры. Особое внимание уделялось проверкам при пониженной температуре окружающей среды и длительной непрерывной работе.

В разделе 4.2 приведены результаты использования в приемных модулях полосно-пропускающих фильтров на высокочастотных диэлектрических резонаторах (ДР), изготовленных по современной технологии в ООО «Керамика» г. Санкт-Петербург. Проведенные работы показали возможность получения температурного коэффициента требуемого знака и величины от минус 6,0 МК⁻¹ до + 15,0 МК⁻¹ для резонаторов с диэлектрической проницаемостью 80 в интервале температур от минус 60° С до +80° С, была установлена зависимость резонансной частоты от условий возбуждения резонатора, что позволило определить точные геометрические размеры и, тем самым, сократить трудоемкость регулировки фильтров при изготовлении в условиях серийного производства.

Раздел 4.3 посвящен вопросу построения приемных трактов с распределенной фильтрацией. В современных космических системах связи необходимо особо решать проблему электромагнитной совместимости, т.е. одновременной работы передающей и приемной аппаратуры. В условиях бортовой системы, где ограничены возможности пространственного разнеса, необходимо решить задачу помехозащищенности приемного тракта при условии выполнении требований минимизации коэффициента шума. Потери входных цепей напрямую увеличивают интегральный коэффициент шума приемного тракта.

Предложено использовать систему распределенной фильтрации, где после первого каскада усиления устанавливается дополнительный полосно-пропускающий фильтр. Значение коэффициента шума блока определяется соотношением:

$$K_{ш} = L_{\phi 1} + (1/K_{\phi 1})((K_{ш 1} - 1) + (L_{\phi 2} - 1)/K_{п 1} + (K_{ш 2} - 1)/K_{\phi 2} K_{п 1}),$$

где $K_{ш}$ – коэффициент шума блока:

$K_{\phi 1}$ – коэффициент передачи первого фильтра;

$K_{ш 1}$ – коэффициент шума первого каскада МШУ;

$L_{\phi 1}$ – потери первого фильтра;

$L_{\phi 2}$ – потери второго фильтра;

$K_{\phi 2}$ – коэффициент передачи второго фильтра;

$K_{п 1}$ – коэффициент передачи первого каскада МШУ;

$K_{ш 2}$ – коэффициент шума второго каскада МШУ.

Основным критерием при решении этой противоречивой задачи является сохранение линейного режима работы каждого каскада приемного тракта при наличии на входе всех помеховых сигналов. При этом $K_{ш}$ – коэффициент шума блока, $L_{\phi 1}$ – потери первого фильтра и $L_{\phi 2}$ – потери второго фильтра должны быть минимальными, а $L_{з\phi 1}$ – запырание первого фильтра и $L_{з\phi 2}$ – запырание второго фильтра должны быть максимальными.

$P_{\text{ВЫХ}}^i < P_{\text{ВЫХ ЛИН}}^i$, где
 $P_{\text{ВЫХ}}^i$ – интегральная выходная мощность каждого каскада усилителя;

$P_{\text{ВЫХ ЛИН}}^i$ – линейная выходная мощность каждого каскада усилителя.

Алгоритм проектирования приемного тракта с распределенной фильтрацией приведен на рис.5.

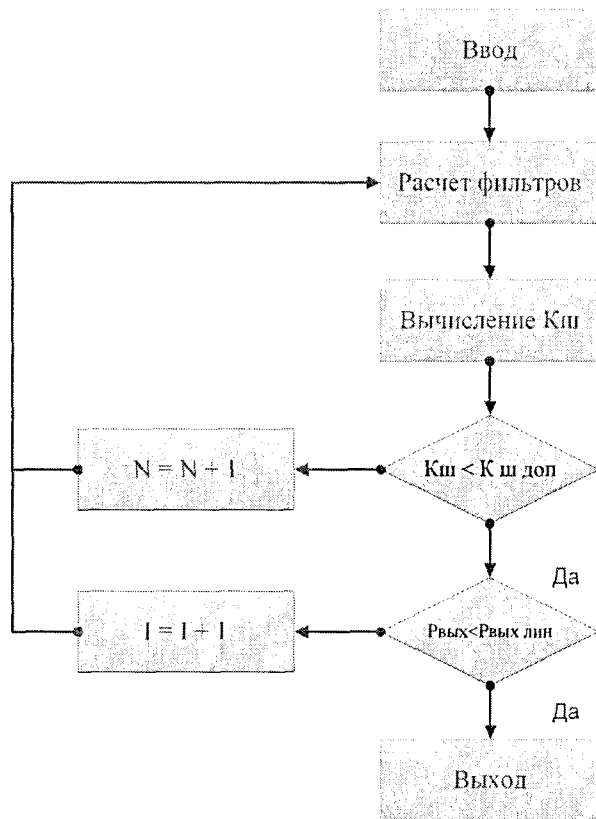


Рис.5 Алгоритм проектирования приемного тракта

Моделирование структуры многокаскадного МШУ с распределенной фильтрацией проводилось с использованием программ AppCAD и Microvawe Office. В результате моделирования была спроектирована и испытана микросборка малошумящего усилителя, удовлетворяющая требованиям помехозащищенности (Рис.6).

Использование компьютерного моделирования и обработка элементов схемы позволило спроектировать микросборку без технологических выводов для предварительной регулировки фильтров, кроме того, при освоении в серийном производстве данная микросборка имеет минимальную трудоемкость регулировки.

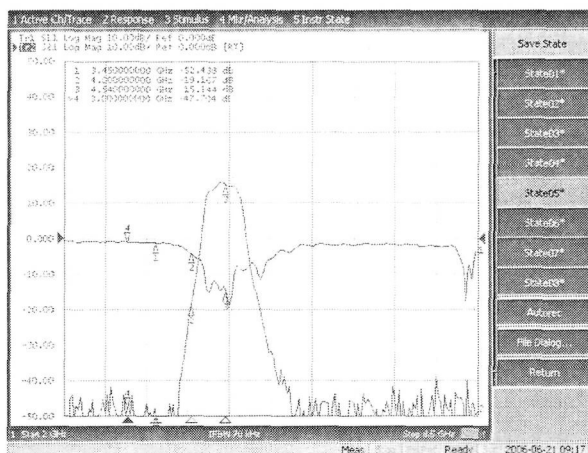
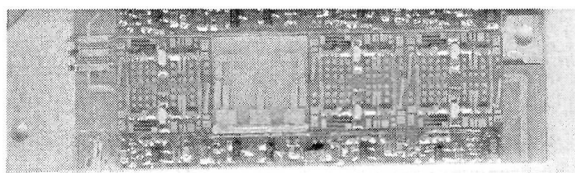


Рис. 6 Микросборка МШУ с распределенной фильтрацией и ее амплитудно-частотная характеристика

Раздел 4.4 посвящен вопросам построения многофункциональных многоканальных приемных модулей многолучевых АФАР.

Построение многолучевых приемных активных фазированных антенных решеток невозможно без решения проблемы построения многоканальных приемных модулей. Число лучей определяет число фазовращателей, задействованных в каждом приемном канале. Для устранения взаимного влияния каналов необходимо обеспечить высокую развязку делителей и сумматоров в рабочей полосе частот, которая складывается из суммы полос всех лучей.

Предложена конструкция многоканальных модулей многолучевой приемной АФАР на основе симметричной двухуровневой разводки, где потери и фазовая длина каждого канала имеют минимальный разброс. Данная концепция лежит в основе конструкции четырехканального приемного модуля АФАР, где каждый приемный канал участвует в формировании восьми лучей.

В разделе 4.5 рассмотрены вопросы оптимизации конструкции СВЧ модулей наземных станций спутниковой связи для организации серийного производства.

В условиях сложной электромагнитной обстановки предъявляются высокие требования к избирательным устройствам как приемного, так и передающего трактов. Чистота спектра выходного широкополосного сигнала системы с преобразованием частоты с низким значением промежуточной частоты, на которой осуществляется модуляция сигнала, может быть достигнута только при использовании полосно-пропускающих фильтров (ППФ) с высокой крутизной скатов. Использование традиционных ППФ в микрополосковом исполнении приводит к увеличению габаритов.

Проведенные исследования показали, что требуемые характеристики с минимальными габаритами выполнимы при использовании высокочастотных диэлектрических резонаторов. Наибольший эффект применения фильтров на ДР достигается при совмещении с технологией поверхностного монтажа элементов, для чего потребовалось определить условия оптимального размещения резонаторов на полосковой плате из стеклотекстолита или любого композитного СВЧ материала. Дан анализ снижения нагруженной добротности ДР при приближении стенок и крышки отсека фильтра.

По главе 4 сделаны следующие выводы:

1. На примере приемных конверторов X- и Ku-диапазонов показано, что технология поверхностного монтажа компонентов эффективна для изготовления единичных образцов с высокими техническими и эксплуатационными характеристиками.

2. Предложен и апробирован метод проектирования приемных трактов АФАР с распределенной фильтрацией. Использование распределенной фильтрации в приемных трактах АФАР обеспечивает помехозащищенность и способность функционирования в сложной электромагнитной обстановке при минимальных шумовых характеристиках.

3. Разработана конструкция многоканальных приемных модулей многолучевых АФАР на основе синфазной двухуровневой разводки, позволяющей получать в полосе частот минимальный фазовый разброс каналов без взаимного влияния каналов. Построение модулей с

использованием данной концепции позволило реализовать бортовую приемную АФАР изделия 14P512 с высокими техническими и массогабаритными характеристиками.

4. Обосновано и практически подтверждено использование полосно-пропускающих фильтров на диэлектрических резонаторах в конструкции СВЧ модулей с технологией поверхностного монтажа элементов, что позволило спроектировать ряд блоков для носимых станций космической связи ИПС-АП, ППС2Г1 и ППС2Г1.01. Блоки имеют высокую технологичность, малую трудоемкость сборки и регулировки.

5. Техничко-экономический эффект от проведенных автором работ достигается за счет:

- проектирования приемных конверторов с высокими техническими характеристиками без специальной организации серийного производства;
- сокращения трудоемкости регулировки полосно-пропускающих фильтров на диэлектрических резонаторах при изготовлении в условиях серийного производства;
- реализации многоканальных модулей многолучевой АФАР с высокой повторяемостью параметров;
- оптимизации конструкции СВЧ модулей наземных станций спутниковой связи для организации серийного производства.

В пятой главе представлены результаты исследований возможности применения в качестве управляющего элемента СВЧ схем микроэлектромеханических (МЭМ) переключателей, изготовленных на основе алмазоподобных пленок. Интерес представляет возможность интеграции МЭМ элементов с активными элементами, реализованными на кремниевой подложке или на арсениде галлия, что позволит на одном кристалле формировать сложную функционально законченную схему с повышением функций до уровня системы.

В разделе 5.1 проведен анализ работы микромеханического переключателя в СВЧ диапазоне.

Для оценки СВЧ характеристик МЭМ переключателей различной топологии и двух типов включения был проведен оценочный расчет с тем допущением, что в открытом состоянии переключателя работает емкость области перекрытия мембраны, а в закрытом состоянии контактное сопротивление. На основе созданной модели определены требования к геометрическим размерам МЭМ переключателя и его элементов.

Показано, что алмазоподобные пленки, нанесенные на материал подложки, не приводят к увеличению потерь микрополосковой линии в СВЧ диапазоне. Исследования проводились на кремниевых и ситалловых подложках.

Сама возможность получения МЭМ переключателей определяется технологическими возможностями. Данные работы проводились на основе технологической базы ФГУП «НИИ Физических проблем им. Ф.В. Лукина».

При изготовлении микромеханических элементов схемы были использованы МЭМС технологии, в частности - балочная и мембранная технологии жидкостного травления и суперпозиции ICP и ECR анизотропного травления.

На основе проведенных исследований дана сравнительная оценка МЭМ переключателей и традиционных ключевых элементов управляющих схем – кремниевых p-i-n диодов и арсенид-галлиевых ПТШ в пассивном включении.

Сравнительная оценка МЭМ переключателей, кремниевых p-i-n диодов и арсенид-галлиевых ПТШ в пассивном включении

Наименование параметра	МЭМ переключатель	Si p-i-n диод	GaAs ПТШ
Время переключения, нсек	1000	1-10	0,1
Ток, мкА	10	1000	1,0
Напряжение, В	3-30	1-20	3-6
Сопротивление в открытом состоянии, Ом	1-5	1-2	3-6
Емкость в закрытом состоянии, пф	0,05-0,2	0,05-0,2	0,2-0,4
Потери на 3 ГГц, дБ	0,1	0,3	0,5
Развязка на 3 ГГц, дБ	20	40	30
Коммутируемая мощность, Вт	0,01-0,1	1-100	0,1
Граница линейности, дБм	70	40-50	30

Видно, что МЭМ переключатели имеют ряд преимуществ и могут служить основой проектирования нового класса управляющих схем.

Проведенные автором исследования выявили ряд проблем, без решения которых невозможно промышленное использование МЭМ переключателей в СВЧ аппаратуре СВЧ диапазона. Основным направлением работ является обеспечение повторяемости параметров и снижение уровня напряжения срабатывания до величины напряжения традиционных логических схем. Необходимость герметизации узлов с МЭМ элементами не является проблемой, поскольку для улучшения массогабаритных характеристик СВЧ аппаратуры космических систем связи используются герметичные блоки с бескорпусными элементами. Очевидным достоинством МЭМ переключателей является радиационная

стойкость и возможность работы при экстремальных температурах в силу механического принципа работы. Понятие линейности или образования интермодуляционных составляющих просто отсутствует до уровня мощности в десятки ватт.

Для оценки эксплуатационных свойств микроэлектромеханических переключателей была проведена оценка критического управляющего напряжения от величины зазора между мембраной и подложкой, определяемого толщиной жертвенного слоя. Напряженне срабатывания определяется по формуле :

$$V_p = [2 \cdot E \cdot t^3 \cdot H^3 / (27 \cdot \epsilon_0)]^{1/2} / L^2$$

-где E – модуль упругости;

t – толщина моста или балки;

H – величина зазора;

L – длина моста или балки.

Оценка уровня минимального управляющего напряжения при толщине жертвенного слоя 1...3 мкм в указывает диапазон в пределах от 3 до 10 В, что позволяет реализовать схему управления на основе типовой кремниевой технологии.

Скорость переключения накладывает ограничения на область применения МЭМ переключателей, однако, при тактовых частотах управления до десятков килогерц данные приборы реализуют свои ключевые свойства. Так первые отечественные образцы МЭМ переключателей прошли тестовые испытания в составе платы радиочастотной идентификации в качестве амплитудного модулятора.

Рабочая частота изготовленной платы составила 1,5 ГГц, а тактовая частота управления не менее 15 КГц. Напряженне управления МЭМ переключателем колебалось от 10 В до 25 В.

В разделе 5.2 рассмотрена возможность реализации интегрального фазовращателя СВЧ диапазона на основе микромеханических переключателей.

В процессе работы была проведена оценка возможности формирования на кристалле фазосдвигающих цепочек для построения интегрального фазовращателя на основе МЭМ переключателей. На основе компьютерного моделирования показана высокая повторяемость параметров и стабильность характеристик в широком диапазоне частот. Проведенные исследования создают предпосылки для созданий на кремниевом кристалле интегральной схемы фазовращателя и, при необходимости, совмещения на одном кристалле аналоговой и цифровой части управления фазовращателем.

В разделе 5.3 рассмотрены перспективы использования микроэлектромеханических элементов СВЧ диапазона в аппаратуре связи и радиолокации.

Показана возможность использования МЭМ элементов в составе герметичной аппаратуры. Определены основные направления исследований и совершенствования технологии изготовления.

По главе 5 сделаны следующие выводы:

1. Промоделированы и спроектированы микромеханические переключатели, что позволило получить СВЧ характеристики первых отечественных МЭМ переключателей на основе алмазоподобных пленок, как основы перспективных многофункциональных схем. По результатам испытаний определены основные направления схемотехнических и технологических работ для улучшения функциональных свойств МЭМ переключателей для использования в СВЧ диапазоне.

2. Показано, что на основе микроэлектромеханических переключателей могут быть спроектированы кремниевые интегральные схемы фазовращателей на частоты до 3 ГГц с фазосдвигающими цепями на сосредоточенных элементах и совмещенной цифровой схемой управления, а широкополосная цепь управления микроэлектромеханическим переключателем может быть реализована на основе резистивной схемы.

3. При обеспечении герметичности аппаратуры микроэлектромеханические элементы соответствуют требованиям по надежности к военной и космической аппаратуре.

В заключении освещены полученные в диссертации научные и практические результаты и указаны наиболее перспективные, на взгляд автора диссертации, направления продолжения работ в части совершенствования систем автоматизированного проектирования, новых схемотехнических подходов и использования элементов, полученных на основе новых технологий.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате диссертационных исследований получены теоретические, научно обоснованные технические решения на основе промышленных технологий микроэлектроники, позволяющие повысить степень интеграции СВЧ аппаратуры. Внедрение результатов диссертационной работы вносит значительный вклад в развитие экономики страны и повышение ее обороноспособности. В процессе выполнения работы получены следующие результаты:

1. Реализован комплексный подход к проектированию арсенид-галлиевых ИС различного функционального назначения в СВЧ диапазоне для использования в приемных и передающих модулях космических систем связи 17P53, В-200, 17P78РП, В-400М.

2. Определены и сформулированы общие и частные конструктивно-технологические требования при проектировании активных элементов арсенид-галлиевых ИС. Получены зависимости характеристик

переключателя на основе арсенид-галлиевого ПТШ в пассивном включении от ширины транзистора, способа включения в СВЧ тракт и рабочей частоты для получения требуемых прямых потерь и запирающего. Показана возможность достижения требуемых характеристик при использовании промышленных эпитаксиальных структур арсенида галлия.

3. Проведена оценка радиационной стойкости арсенид-галлиевых ИС и их надежностные характеристики для построения на их основе аппаратуры для космических аппаратов со сроком активного существования более 10 лет. Предложена методика оценки времени потери работоспособности СВЧ арсенид-галлиевых ИС во время импульсного воздействия факторов ядерного взрыва по динамическим характеристикам.

4. Подтверждена целесообразность проектирования топологии кристаллов усилителей мощности на основе непосредственного измерения параметров ПТШ на большом уровне сигнале методом тестовых плат. Данный подход сокращает число итераций при проектировании и обеспечивает высокое совпадение параметров, заданных и полученных экспериментально.

5. Показана эффективность сквозных металлизированных отверстий для заземления элементов СВЧ интегральной схемы в произвольном месте кристалла и обеспечении отвода тепла от активной зоны транзистора. Проведен сравнительный анализ влияния на параметры арсенид-галлиевых ИС проволочных выводов и плоских проводников. Показано, что на частотах выше 10 ГГц плоские проводники имеют меньшее влияние на параметры интегральных усилителей.

6. Показана возможность построения функциональных узлов СВЧ диапазона и сложных многофункциональных устройств, таких как регулятор комплексных амплитуд, на основе однокаскадных усилителей в монолитном исполнении для повышения унификации аппаратуры.

7. Предложена схема унифицированного переключательного кристалла, позволяющая реализовать на его основе многоуровневый фазовращатель, фазовый модулятор, согласованный ключ и плавный аттенуатор в диапазоне частот до 5 ГГц.

8. Разработана конструкция многоканальных приемных модулей многолучевых АФАР на основе синфазной двухуровневой разводки, позволяющая получать в полосе частот минимальный фазовый разброс каналов без взаимного влияния каналов. Построение модулей с использованием данной концепции позволило реализовать бортовую приемную АФАР изделия 14Р512 с высокими техническими и массогабаритными характеристиками.

9. Предложен и апробирован метод проектирования приемных трактов АФАР с распределенной фильтрацией. Использование

распределенной фильтрации в приемных трактах АФАР обеспечивает помехозащищенность и способность функционирования в сложной электромагнитной обстановке при минимальных шумовых характеристиках.

10. Технические обосновано использование полосно-пропускающих фильтров на диэлектрических резонаторах в конструкции СВЧ модулей с технологией поверхностного монтажа элементов, что позволило спроектировать ряд блоков для носимых станций космической связи ИПС-АП, ППС2Г1 и ППС2Г1.01. Блоки имеют высокую технологичность, малую трудоемкость сборки и регулировки. Использование технологии поверхностного монтажа позволило в короткие сроки спроектировать, изготовить и испытать приемные конвертеры Ку- и X- диапазонов для станций приема информации с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли 11Ф664 №2 и «Метеор-3М», соответственно.

11. Промоделированы и спроектированы микромеханические переключатели, что позволило получить СВЧ характеристики первых отечественных МЭМ переключателей на основе алмазоподобных пленок, как основы перспективных многофункциональных схем. По результатам испытаний определены основные направления схемотехнических и технологических работ для улучшения функциональных свойств МЭМ переключателей для использования в СВЧ диапазоне.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

1. Ефимов А.Г. Построение приемного тракта многолучевой АФАР с распределенной фильтрацией. Вопросы радиоэлектроники, Сер. РЛТ, Вып. 1, 2008, С. 41-45.
2. Ефимов А.Г. Конструкция многоканального приемного модуля многолучевой АФАР. Вопросы радиоэлектроники, Сер. РЛТ, Вып.1, 2008, С. 38-41.
3. Ефимов А.Г. Построение многофункциональных СВЧ узлов на основе монолитных многокаскадных усилителей. Вопросы радиоэлектроники, Сер. РЛТ, Вып.4, 2008, С. 177-180.
4. Ефимов А.Г. Использование арсенид-галлиевых ИС усилителей мощности в СВЧ аппаратуре. Вопросы радиоэлектроники, Сер. РЛТ, Вып.4, 2008, С. 181-191.
5. Ефимов А.Г. Конструкция передающего модуля для серийного производства. Вопросы радиоэлектроники, Сер. ЭВТ, Вып.5, 2008, С. 156-160.
6. Ефимов А.Г., Панин В.Ф., Петров В.Г. Использование в приемных модулях полосно-пропускающих фильтров на диэлектрических

- резонаторах. Вопросы радиоэлектроники, Сер. ЭВТ, Вып.5, 2008, С. 160-164.
7. Ефимов А.Г., Панин В.Ф. Полосно-пропускающие фильтры на диэлектрических резонаторах с высокой проницаемостью, Изв. Вузов. Электроника, 2008, №6, С.79-80.
8. Ефимов А.Г., Лось В.О., Панин В.Ф. Аппаратура приема информации дистанционного зондирования Земли с ИСЗ. Вопросы радиоэлектроники, Сер. РЛТ, Вып.1, 2009, С. 181-191.
9. Ефимов А.Г. Многоканальный приемный модуль многолучевой АФАР. Вопросы радиоэлектроники, Сер. СОИУ, Вып. 1, 2009, С. 133-137.
10. Власенко В.А., Ефимов А.Г., Ильичев Э.А., Полторацкий Э.А. Перспективы использования элементов микроэлектромеханических систем в СВЧ модулях. Вопросы радиоэлектроники, Сер. СОИУ, Вып. 1, 2009, С. 137-143.

Материалы международных конференций

11. Гуськов Г.Я., Ефимов А.Г., Мартынова В.П., Сигачев А.В., Тихонюк В.И. Современные интегральные схемы СВЧ диапазона на основе арсенида галлия и его твердых растворов./ 3-я Международная конференция «Спутниковая связь». Тезисы докладов, Москва, 1998, II том, С.290-291.
12. Ефимов А.Г., Панин В.Ф., Лось В.О. Аппаратура приема информации дистанционного зондирования Земли с ИСЗ «Метеор-3М». В кн.: 13-я Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2003) Материалы конференции. [Севастополь, 8-12 сентября 2003г.]. – Севастополь: Вебер, 2003, С.748-740. ISBN 966-7968-26-Х.
13. Ефимов А.Г., Панин В.Ф., Лось В.О. Универсальный пункт приема информации дистанционного зондирования Земли с ИСЗ. В кн.: 15-я Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2005) Материалы конференции. [Севастополь, 8-12 сентября 2005г.]. – Севастополь: Вебер, 2005, С.939-940. ISBN 966-7968-26-Х.
14. Ефимов А.Г., Панин В.Ф., Лось В.О. Универсальный приемник L-диапазона для приема информации дистанционного зондирования Земли с ИСЗ. В кн.: 16-я Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2006) Материалы конференции. [Севастополь, 8-12 сентября 2006г.]. – Севастополь: Вебер, 2006, С.748-740. ISBN 966-7968-26-Х.
15. Адоньева З. П., Базин И. Б., Ефимов А. Г. Выбор фазовращателя для приемно-передающего модуля АФАР X-

диапазона. – В кн.: 15-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2005). Материалы конф. [Севастополь, 10-14 сент. 2005 г.]. – Севастополь: Вебер, 2005, С.143-144.

Авторские свидетельства и патенты

16. Ержанов Р.Ж., Ефимов А.Г., Панасенко П.В. и др.
Резистор арсенид-галлиевой интегральной схемы.
Авт. Св-во по заявке №3638169/24-25 кл.Н01/06 от 2.09.83г.
17. Ефимов А.Г., Олесов С.И. Приемная многолучевая активная фазированная антенная решетка. Заявка №2007135144/09(038427) от 24.09.2007г. - Решение о выдаче патента РФ от 29.09.2008 г.
18. Ефимов А.Г. СВЧ фазовращатель на основе полупроводниковой схемы. Заявка №2008144755/09(038427) от 12.11.2008г.

Статьи

19. Буянов Н.Н., Ефимов А.Г., Мартынов В.П., Панасенко П.В. Машинный анализ работы коммутационного ключа на основе арсенид-галлиевого транзистора с затвором Шоттки.
Электронная техника Сер.10 Микроэлектронные устройства Вып.2(56) 1986, С.28-32.
20. Ержанов Р.Ж., Ефимов А.Г., Панасенко П.В., Панин В.Ф. Монолитная схема плавного фазовращателя сантиметрового диапазона. Спец. Электроника. Сер.10. Микроэлектронные устройства Вып.1(189) ч.1. 1983. С.40-41 .
21. Гуськов Г.Я., Панасенко П.В., Мартынов В.П., Панин В.Ф., Ержанов Р.Ж., Ефимов А.Г. Опыт создания МИП на GaAs и аппаратуры на их основе. Спец. Электроника. Сер.1. Устройства СВЧ. Вып.2. 1987. С.8-12.
22. Адоньева З.П., Буянов Н.Н., Ефимов А.Г. и др. Трехразрядный фазовращатель X- диапазона на арсенид-галлиевых монолитных ИС. Спец. Электроника. Сер.10. Микроэлектронные устройства. Вып.1(230) 1986. С.12.
23. Буянов Н.Н., Ефимов А.Г., Мартынова В.П., Панасенко П.В. СВЧ ключ на арсенид-галлиевом полевом транзисторе.
Электронная техника. Сер.10 Микроэлектронные устройства Вып.2(56) 1986. С.31-35.
24. Панасенко П.В., Нарнов Б.А., Ионов Б.В., Ефимов А.Г. Технология изготовления МПТШ на GaAs с улучшенным теплоотводом и безындуктивным выводом. Спец. Электроника. Сер.10. Микроэлектронные устройства. Вып.1(230) 1986. С.14-16.
25. Ефимов А.Г., Мартынов В.П., Мартынова В.П., Панасенко П.В., Панин В.Ф. Арсенид-галлиевые ИС СВЧ фазовращателей.

- Спец. Электроника. Сер.10 Микроэлектронные устройства. Вып.1(21) 1987. С.17-19.
26. Ефимов А.Г., Панасенко П.В., Поздняков А.Г. Оценка надежности ИС МШУ на GaAs по результатам ускоренного термовоздействия. Спец. Электроника Сер.10. Микроэлектронные устройства. Вып.1(21) 1987. С.23-27.
27. Ефимов А.Г., Иванов Ю.Н., Макаревич А.Л. и др. Особенности реакции арсенид-галлиевой ИС маломощного усилителя на воздействие ионизирующих излучений. Специальные вопросы науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. Вып.3 1986. С.70-74.
28. Ефимов А.Г. Мартынов В.П., Панасенко П.В., Панин В.Ф. Модуль усилителя средней мощности трехсантиметрового диапазона на арсенид-галлиевых ИС. Спец. Электроника. Сер.10. Микроэлектронные устройства. Вып.1(270) 1988. С.82-83.
29. Ефимов А.Г., Панасенко П.В., Панин В.Ф., Романов И.А. Усилитель средней мощности десятисантиметрового диапазона на арсенид-галлиевой ИС. Спец. Электроника. Сер.10. Микроэлектронные устройства. Вып.1(270) 1988. С.83-84.
30. Панасенко П.В., Нагурский С.Б., Ефимов А.Г., Панин В.Ф. Селективный усилитель для формирователя частоты. Спец. Электроника сер.10. Микроэлектронные устройства. Вып.1(71) 1985. С. 12-14.
31. Гуськов Г.Я., Ефимов А.Г., Мартынов В.П., Панасенко П.В., Панин В.Ф., Поздняков А.Г. Малошумящий усилитель на основе монолитной арсенид-галлиевой ИС. Спец. Электроника. Сер.10. Микроэлектронные устройства. Вып. 1(21) 1987. С.19-23.
32. Ахмадеев Р.Г., Ефимов А.Г., Кочлашвили Г.И., Панасенко П.В., Панин В.Ф. Трехсантиметровый усилитель мощности. Спец. Электроника. Сер.10. Микроэлектронные устройства. Вып. 1(189) ч.1. 1983. С.41.
33. Ефимов А.Г., Панасенко П.В., Панин В.Ф., Романов И.А., Нарнов Б.А. Полупроводниковая интегральная схема четырехкаскадного усилителя мощности трехсантиметрового диапазона. Специальная электроника. Сер.10. Микроэлектронные устройства. Вып.1(26) 1990. С. 11-13.

Материалы конференций и семинаров

34. Ефимов А.Г., Романов И.А. Четырех ваттный усилитель мощности сантиметрового диапазона на полевых транзисторах с затвором Шотки. Широкополосные устройства высоких и сверхвысоких частот. Межвузовский сб.

- научных трудов(Новосибирский электротехнический институт)
Новосибирск. 1990. С.200.
35. Ефимов А.Г., Иванов Ю.Е., Панасенко П.В., Романов И.А.
Усилители мощности СВЧ диапазона на основе
полупроводниковых интегральных схем.
Семинар «Проблемы и перспективы построения широкополосных
усилителей мощности в системах передачи информации»
Севастополь, 1990.
36. Ефимов А.Г., Романов И.А. Синтез с помощью ЭВМ
согласующих цепей усилителей мощности на основе
полупроводниковых интегральных схем. Семинар «Современная
технология производства СВЧ схем». Минск. 1989.
37. Горячев А.В., Власенко В.А., Беляев С.Н., Ефимов А.Г.,
Ильичев Э.А. и др. MEMS переключатели для RF систем на
основе алмазоподобных углеродных пленок/ Материалы
конференции «Нанотехнологии производству 2007». Фрязино, 2007.
38. Гуськов Г.Я., Горобец Н.Н., Забышный А.И., Ефимов А.Г.,
Ильгасов П.А., Орлов О.Е., Панин В.Ф., Панцов В.Ю., Черный И.В.
Сканирующий радиометр-спектрометр мм-диапазона.//
Всесоюзная конференция "Применение дистанционных
радиофизических методов в исследованиях природной среды".
Тезисы докладов, Ереван, 1990, С.148-149.
39. Ефимов А.Г., Романов И.А. Арсенид-галлиевые ИС усилителей
мощности СВЧ диапазона /2-я Крымская конференция «СВЧ –
техника и спутниковый прием». Материалы конференции.
Севастополь, 1992, С.267-272.
40. Ефимов А.Г., Панин В.Ф., Панцов В.Ю., Черный И.В.
Многоканальный радиометр-спектрометр миллиметрового
диапазона/2-я Крымская конференция «СВЧ –техника и
спутниковый прием». Материалы конференции. Севастополь,
1992, С.417-422.

Научно-технические отчеты по НИОКР

41. Разработка бескорпусной микросборки СВЧ малошумящего
усилителя на монокристаллической арсенид-галлиевой ИС. Научно-
технический отчет по ОКР «Стриж-1» /Ефимов А.Г.–
исполнитель, НИИМП, Москва, 1984. Гос. Регистр. №У93873.
42. Разработка технологии изготовления монокристаллической ИС СВЧ
малошумящего усилителя на арсениде галлия. Научно-
технический отчет по НИР «Стриж» /Ефимов А.Г. – исполнитель,
НИИМП, Москва, 1982. Гос. Регистр. №У82937.
43. Разработка технологии изготовления СВЧ усилителей средней
мощности на монокристаллической арсенид-галлиевой ИС. Научно-

- технический отчет по НИР «Струг-1» / Ефимов А.Г. – отв. Исполнитель, НИИМП, Москва, 1986. Гос. Регистр. № М15394.
44. Исследование возможности создания СВЧ фазовращателя на монокристаллической арсенид-галлиевой ИС. Научно-технический отчет по НИР «Спираль» /Ефимов А.Г. – отв. исполнитель, НИИМП, Москва, 1985. Гос. Регистр. №Ф22431.
45. Исследование и разработка модуля СВЧ усилителя мощности на монокристаллической арсенид-галлиевой ИС. Научно-технический отчет по НИР «Сакта»/ Ефимов А.Г. – зам. научного руководителя, НИИМП, Москва, 1992.
46. Разработка базовой конструкции усилителей средней мощности на основе арсенид-галлиевых ИС. Научно-технический отчет по НИР «Сюжет»./Ефимов А.Г. – научный руководитель, НИИМП, Москва, 1994.
47. Разработка лабораторной технологии формирования металлизированных сквозных отверстий в подложках арсенид-галлиевых ИС. Научно-технический отчет по НИР «Скань»/ Ефимов А.Г. – исполнитель, НИИМП, Москва, 1987. Гос. регистр. №1153.
48. Разработка раздела комплексно-целевой программы работ по созданию монокристаллических приборов на арсениде галлия на период 1991-1995 г.г. Научно-технический отчет по НИР «МАЛАХИТ-ЭЛАС»./Ефимов А.Г. – отв. исполнитель, НИИМП, Москва, 1991.
49. Исследование и разработка технологических процессов для создания базовой технологии изготовления СВЧ монокристаллических интегральных приборов на арсениде галлия.; Научно-технический отчет по НИР «База-ЭЛАС»./Ефимов А.Г. – отв. Исполнитель, НИИМП, Москва, 1997.
50. Разработка базовых конструкций и технологии изготовления приемных и передающих модулей на основе монокристаллических арсенид-галлиевых ИС в диапазоне 10-40 ГГц для перспективных образцов В и ВТ.; Научно-технический отчет по НИР «Демократизм»./Ефимов А.Г. – отв. исполнитель, НИИМП, Москва, 1999.
51. Разработка и исследование многоканальных радиометрических бортовых приемных комплексов КВЧ. Научно-технический отчет по НИР «Радиометр»/ Ефимов А.Г. – исполнитель, НИИМП, Москва, 1989.
52. Разработка технологии получения нанокристаллических материалов, интегрированных в технологию изготовления устройств бесконтактной радиочастотной идентификации. Научно-технический отчет по НИР «Радиометка»./ Ефимов А.Г. – исполнитель, НИИФП, Москва, 2006.

Принято к исполнению 17/02/2009

Исполнено 18/02/2009

Заказ № 211

Тираж 100 экз.

ООО «СМСА» ИНН 7725533680
Москва, 2й Кожевнический пер., 12
+7 (495) 604-41-54 www.cherrypie.ru